

サイドプレート方式による角形鋼管柱仕口における

三次元弾塑性解析 およびその実験

横浜国大 青木博文

日本鋼管 瀬古 哲 ○石村 博

1. 序

角形鋼管柱における柱・はり接合部の仕口については、従来から種々の方法が考えられてきたが、ダイヤモンド形式および外周スチフナー形式の2形式に代表されるものが、最も一般的に用いられている。これらに対して本論文では、はりフランジの応力を角形鋼管柱の側板に効率よく伝える目的で図-1に示す接合形式を考え応力の伝達機構と強度、剛性について検討を行った。

この接合形式によれば角柱内にはダイヤモンドを必要とせず、また外周にプレートをめぐることも不要であると同時に仕口加工も柱の外側のみで可能となる利点がある。以下この形式をサイドプレート形式と仮称することにする。また、図-1において、はりフランジに接続する水平板をフランジプレート、フランジプレートの両側において柱ウェブに接続する垂直板をサイドプレートと呼ぶことにする。これに類似の形式による接合部の研究としては、薄肉の角形鋼管柱に適用した実験

および解析¹⁾があり、その結果では三角形補強板(サイドプレート)の補強効果は極めて良好であった。いっぽう本論文で対象としている角形鋼管柱のサイズは、一般鉄骨造に用いられるものを想定しており、また、サイドプレートは、補強というよりはむしろそれ自体が応力伝達媒体の一つの主要な構成要素を成すという積極的な目的で用いられている。はりからの応力は図-2で矢印の様に仕口内を伝わることを期待しており、この際、はりフランジに水平方向の広がりをもった応力の作用面は、この仕口内で、はりフランジとは垂直方向の柱側板へと変換されるものと考えられる。

このようにサイドプレート形式の接合仕口部は極めて立体的な力学的性状を示すと予想されるので三次元解析が不可欠となる。本論文では、有限要素法三次元弾塑性解析によりサイドプレート仕口の応力分布と最適形状について検討し、仕口部のモデル実験結果と比較して解析の妥当性を調べている。

2. 解析モデル

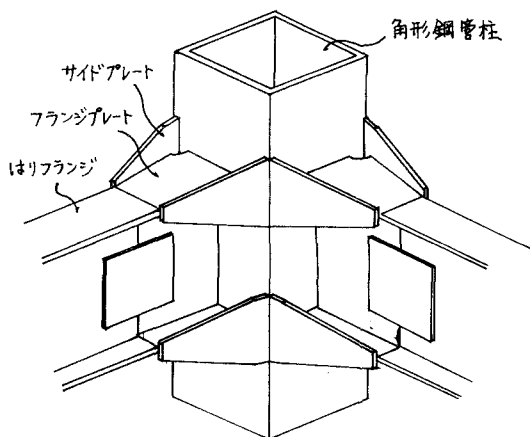


図-1 サイドプレート方式による
柱・はり接合部

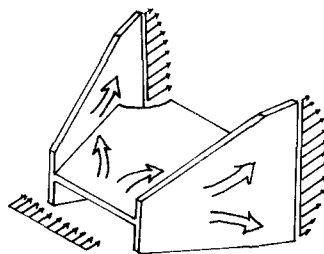


図-2 接合体における応力の流れ

2-1 形状

フランジプレートおよびサイドプレートの最適な形状を検討するために、解析モデルとして図-3に示す9種類を考えた。これより先、簡単な予備解析を行った結果と形状の設計への適用性を考慮して、BF-2を基本のタイプとした。BFはフランジプレートの長さを変化させ、BTは板厚を変化させたものである。BRは設計上の納りを考えサイドプレートを上下非対象にした場合の性状を調べている。

2-2 支持条件、外力

解析は、対称性を考慮して、BF, BTタイプで1/4部分、BRタイプで1/2部分だけを計算している。支持条件は、この対称性を満たすように図-5のようにしている。

外力はフランジプレート端で等分布荷重となるような節点力を加える場合と強制的に変位を与えるものについて解析している。

2-3 要素分割

電子計算機は、東京大学大型計算機センターHITAC-8800を使用し、節点数400、ユニット数20、ユニット内点25、外点40のプログラムを用いている。

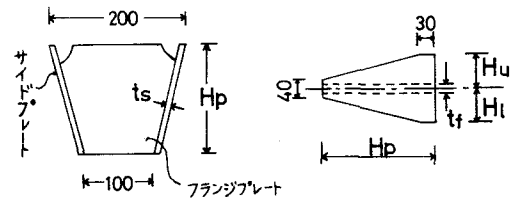
モデルは、BF, BTタイプで143、BRで195~222の節点で分割している。BF-2の分割例を図-4に示す。

3. 解析

3-1 プログラム

本解析に用いた三次元弾塑性有限要素法のプログラムは、通常の剛性マトリックス法の増分法によるものであるが、塑性域ではPrandtl-Reussの式を用いてあり、また、要素の剛性は、一つの要素について、四面体を基本形とする更に小さな5つの要素に分割し、更に切り方を変えて、もう一度5つの要素に分割し、この2通りの切り方で

	H_p	t_f	t_s	H_u	H_l
BF-1	100	12	12	50	50
BF-2	150	12	12	50	50
BF-3	200	12	12	50	50
BT-1	150	16	12	50	50
BT-2	150	12	16	50	50
BT-3	150	16	16	50	50
BR-1	150	12	12	6	94
BR-2	150	12	12	25	75
BR-3	150	12	12	40	60



H_p ; フランジプレート長さ t_f ; フランジプレート板厚
 t_s ; サイドプレート板厚 H_u ; サイドプレート上側の高さ
 H_l ; サイドプレート下側の高さ
 図-3 モデル形状

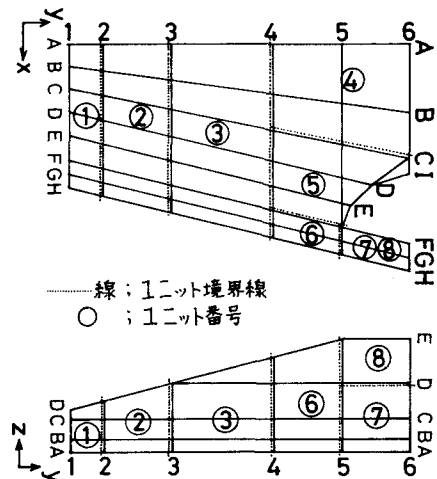


図-4 要素, 1ユニット分割

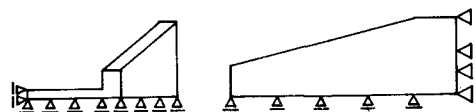


図-5 支持条件

求めた剛性の平均値をとっている。

3-2 解析の仮定

鋼素材の機械的性質として、ヤング率 2100 t/cm^2 、降伏点 2.5 t/cm^2 とし、 δ - ε 曲線は図-6 に示されている。材料は等方等質であるとする。

3-3 解析結果

3-3-1 モデルの強度、剛性

最初に降伏する要素が現われるまで（弾性範囲）の剛性、強度を図-7, 8 および表-1 に示した。A点とF点とで剛性を比較するとサイドプレートに近いF点が高い剛性を示していることがわかる。BF-2と比較すると、BFタイプでは、フランジプレートが短くなると降伏荷重が著しく低下している。BTタイプではフランジプレートの板厚の変化の方が全体の剛性、強度に及ぼす影響が大きく、BT-2とBF-2の降伏荷重が一致していることから、サイドプレートの板厚の変化は、剛性のみに寄与していると考えられる。BRタイプではサイドプレートが上下非対称の場合、上下の高さの比の違いが剛性、強度に及ぼす影響は顕著であることがわかるがBR-3（40:60）ではBF-2とほぼ一致した値となっている。

3-3-2 応力の流れ

BF-2について入力を外力と強制変位との2通りで与えそれぞれ弾塑性解析した時の仕口の応力状態を等価応力の等高線で表わしたのが図-11, 12 である。またこの時の降伏要素の順番を示すのが図-9, サイドプレートの柱との接合部における垂直応力（ σ_y ）の分布の様子を示したのが図-10 である。

変位による入力の降伏点は、外力による場合に比べかなり低い値を示すが、図-11 によればサイドプレートの先端部（はり）と接続する側）の断面積が小さくなっている部分に応力が集中して

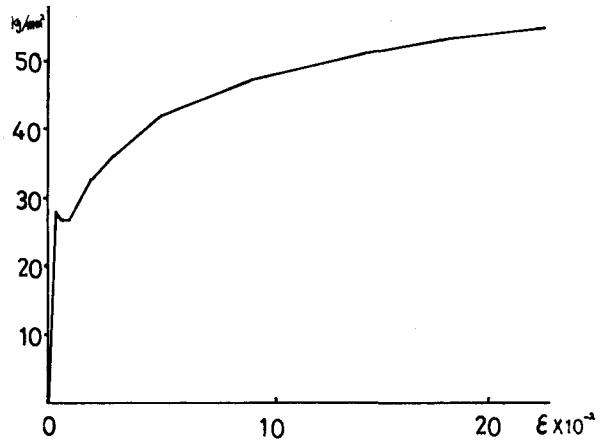


図-6 σ - ε 曲線

	BF-1	BF-2	BT-1	BT-2	BT-3	BR-1	BR-2	BR-3
降伏荷重 P (t)	5.39	8.24	10.52	8.24	10.73	11.30*	14.96*	16.05*
F点の変位 δ ($\times 10^{-2}$ cm)	0.82	1.12	1.27	0.95	1.13	1.20	1.14	1.09
P/ δ (t/cm)	659	735	828	820	985	471*	655*	735*

* BR タイプは上下非対象の為、他のモデルと比較する時は荷重を $1/2$ にしなければならない。

表 1 各モデルにおけるF点の荷重変位関係

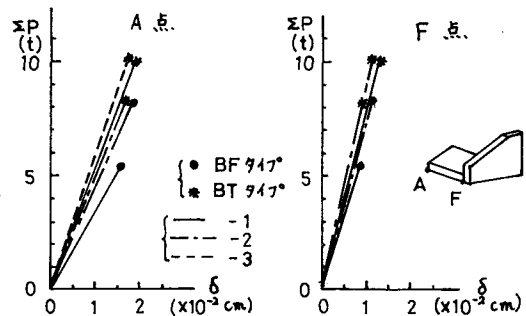


図-7 BF, BT タイプ P- δ 図

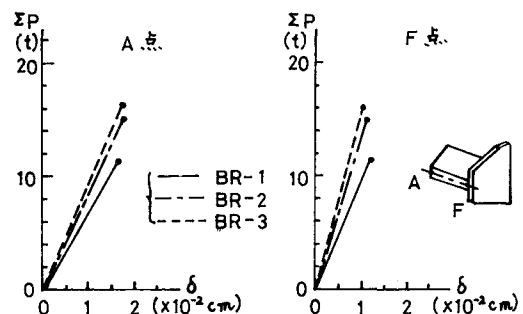


図-8 BR タイプ P- δ 図

降伏しているのがわかる。このような入力の場合、サイドプレートとフランジプレートとの溶接性のみを考えて設けたサイドプレート先端部の高さも仕口全体の強度に大きな影響をおよぼすことが認識された。フランジプレート部分の応力の流れは変位による入力の方が滑らかなのであるが、これは、フランジプレート部分が負担する外力が小さいためによるものと考えられる。外力による入力の場合も、フランジプレート先端部が降伏し、力の流れがサイドプレートに集中するようになり、フランジプレート部分が負担する力が減少してくると、滑らかな流れを示すようになって変位の場合に類似してゆく様子が、図-11, 12 からわかる。

図-11, 12 のどちらの場合においても、塑性域に入ると降伏の進行は、ヨブスカーラップ部分から始まって、サイドプレートとフランジプレートとの接合部分に沿って順次進んでゆく傾向にあるが、この部分は応力が急変する部分であると考えられるので、実際の設計の際には特に注目することが必要な部分であろうと思われる。

サイドプレート内の等価応力等高線はほぼ平行線を描いており、柱ウェブ部には、滑らかな曲線で表わされる分布荷重となって伝達してゆくものと推測される。実際、柱ウェブとの接合部の y 軸方向（外力の方向）の垂直応力 σ_y を調べてみると図-10の如くになって、ほぼ等分布荷重となっていることがわかる。尚、図-10に示される応力分布はサイドプレートのフランジプレート側半分の板厚の部分の応力分布であり、残りの片方の応力分布もやはり等分布に近いが、この両者は影響し合って接合部に面外の曲げが生じている

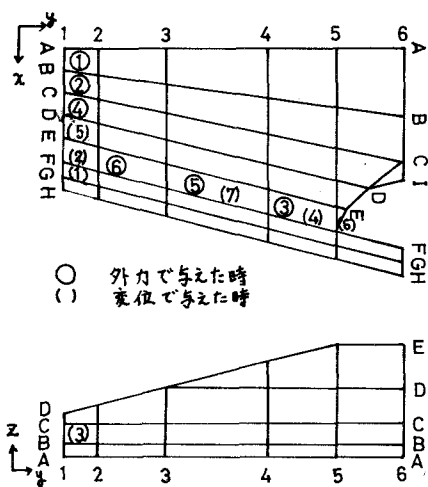


図 9 要素の降伏順序

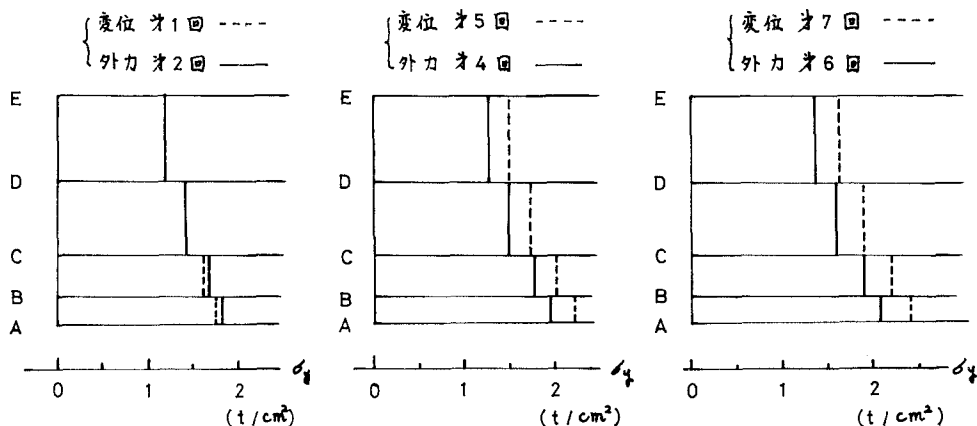


図-10 柱ウェブ部の σ_y の分布

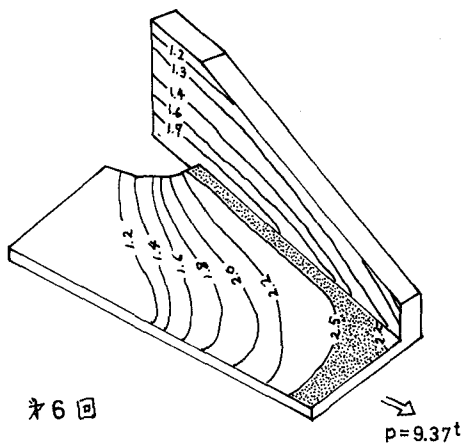
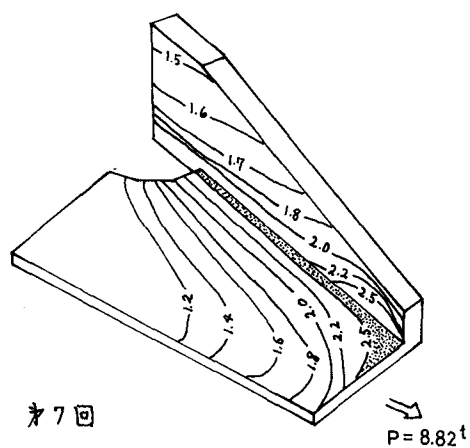
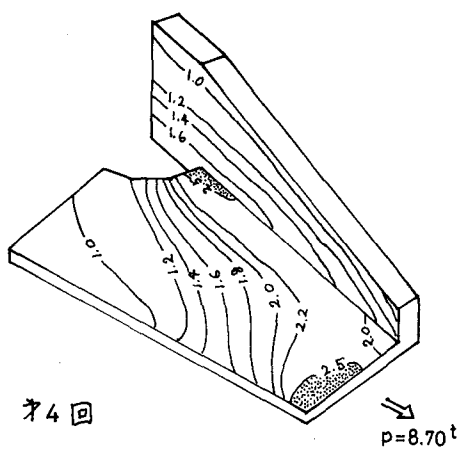
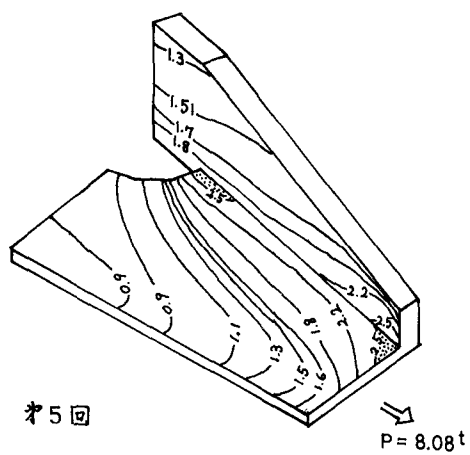
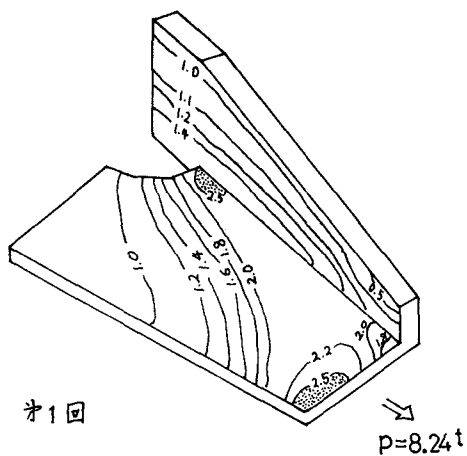
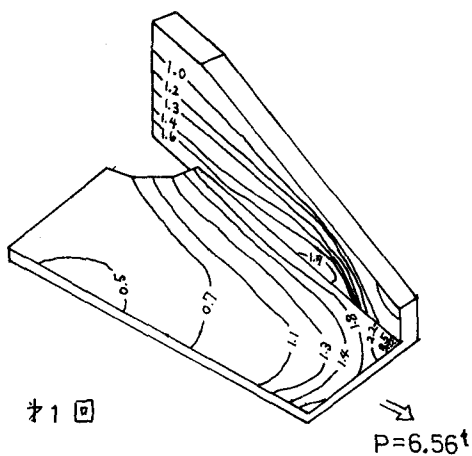


図-11 変位で入力したBF-2の応力図

図-12 外力で入力したBF-2の応力図

4. 実験

4-1. 試験体および鋼素材

試験体は、柱として $200 \times 200 \times 12 \times 12$ の角形鋼管柱を使用し、サイドプレート方式による仕口部は 12mm 厚の鋼板を溶接加工して製作した。素材は、柱材、板材共に SS41 を用いた。鋼板の引張り試験の結果は図13に示されている。試験体の寸法は図-15に示されているとおりであり、仕口部材の溶接は半自動炭酸ガス溶接で行った。

4-2. 試験方法

荷重は 120 ton センターホール式ジャッキを使用して行い、試験体のつかみ部分（両側）でピン載荷した。実験装置の様子を図-14に示す。

4-3. 測定方法

荷重は油圧ジャッキ先端部に取り付けたロードセルにより測定し、変位は該当部に溶接したボルト間の距離をダイヤルゲージ ($1/100$) で計測し、左右対称位置の値を平均して求めた。

また、サイドプレートおよびフランジプレート部にはポリエステルゲージ ($l = 10\text{mm}$) および塑性歪ゲージ ($l = 10, 5\text{mm}$) を貼付し、各荷重段階ごとに歪を測定した。

4-4. 実験の状況および結果

実験では一方向に単純引張載荷したが、載荷の途中でサイドプレート部分の変形量に比べ、フランジ部分の変形および歪量が圧倒的に大きくなり、最終的には、このフランジ部の破断によって破壊した。この時のフランジの破断応力は 49 kg/mm^2 で図-13に示す素材引張試験における最大応力にはほぼ一致している。

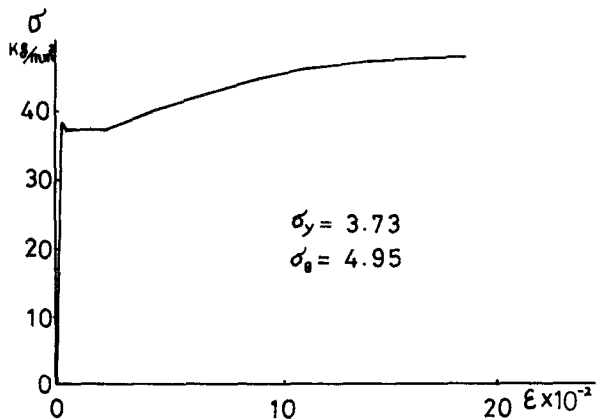


図-13 素材の σ - ϵ 曲線

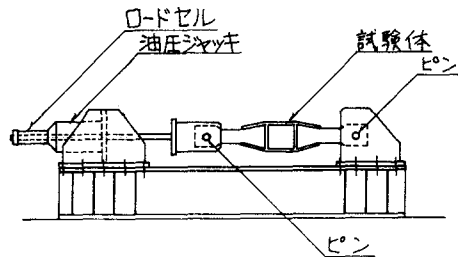


図-14 試験状況

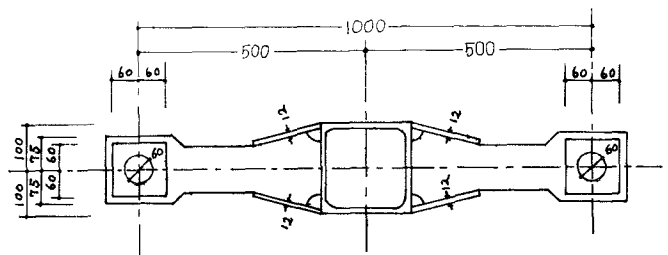


図-15 試験体寸法

5. 実験と解析の比較

5-1. P- δ 関係の比較

図-16はBF-2の荷重変位曲線を示すもので、解析では図中のA点およびF点について求めてあり、

実験値は、F点についてのみ求めた結果である。

図に示されるように、解析によると、実験値に比べ、剛性が高く、降伏値は低下している。剛性については、有限要素法では、節点数の多少などにより影響を受けると考えられるが、また、実験的な立場からみた場合、解析結果と実験結果のズレは、試験体の制作過程における、精度、溶接性、残留応力などの原因があり、更に測定による誤差が影響する。今回の実験の場合、焼鈍を行っていないので、特に残留応力の影響は大きいものと考えられる。

降伏応力について解析では 2.5 t/cm^2 と仮定したのに比べ、試験体では素材試験の結果、 3.73 t/cm^2 という高い値が測定された。解析結果の降伏開始点 $P=8.24$ (外力による入力) において、単純に素材の降伏値の比 $3.73/2.50$ を乗ずると、 12.3 となって、実験値 11.0 より高くなる。

更に、図 6.13 から素材の引張試験の結果を比較してみると、やはり著しい差異がみられるが、本解析の場合、塑性域での繰返し回数が 7 回であり最も塑性化が進行した要素でも、 σ - ϵ 曲線においては、わずかに柵の部分に入った程度のあるので、図-16 では、 σ - ϵ 曲線の影響は極めて小さいと思われる。

図-16 で変位による入力の場合、降伏点が低いのは、サイドプレートが強制変位を受けて局部的に大きな応力が生じているためと考えられるが、サイドプレート周辺は、実際は剛性が高く、フランジプレート中央部と同一の変形をすることは考えられない。これは、外力による入力のグラフで、A点とF点とでは、かなりの変位の差があることから推測できる。実際の入力の状況はフランジプレートに続いたはりフランジを介して行われるものであり、接続部で応力集中、溶接とその欠陥の影響などが考えられるので、モデル化の際、この点に注意を払うべきであろう。

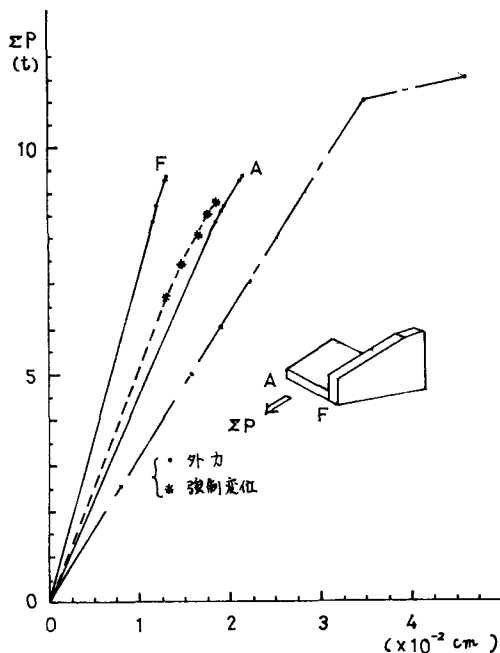


図 16 P- δ 曲線

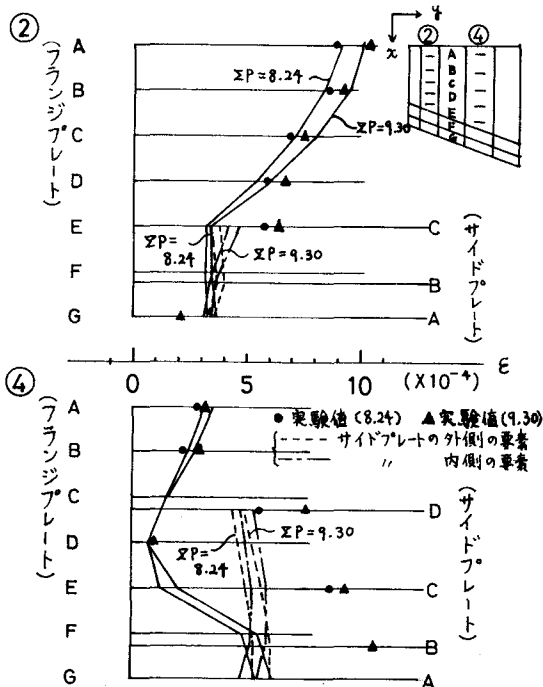


図 17 実験値と解析値の y 方向の歪

実験の状況ではサイドプレートに比べフランジ部の変形が圧倒的に大きく、このフランジ部で破断が起っていることから、今回の実験の場合、外力による入力の方が、試験体の挙動に近かったと云えるであろう。

5-2. 歪の比較

図-17はBF-2について図中の略図に示されている点における歪の値を、実験値と解析値について求め比較したものである。図から明らかなようにフランジプレート部分では、実験値と解析値は非常によく一致している。サイドプレート部分では、値そのものの一致はみられないが、全体的な挙動はだいたい類似していると云える。しかしながら、サイドプレートの実験値は、歪ゲージがプレートの外側のみしか貼付できなかった為、平均した値が求められなかった。したがって数値解析の値と単純に比較することはできないので、単なる参考データとしたい。

6. まとめ

実験結果から数値解析による結果が大体の特性を表わしていると考えられるが、この解析法により求めた力の流れの様子も予想通りであって、この形式による仕口の力学的な裏付けが得られた。また実験結果でも、解析結果からの予想でも破断は、はりフランジ部で起っていることから、この形式の仕口は、力の伝達媒体として、十分に効力を発揮することがわかった。

本論文においては、主にBF-2について論じてきたが、更に各種のタイプについての実験、解析を行い、また柱・はり接合部の全体的な挙動についても検討してゆく方針である。

参考文献

- 1) 鷲尾健三, 石沢則哲 / 角形鋼管接合部の研究(その7, 三角形補強板をつけた場合) /
日本建築学会論文報告集第87号 昭和38年7月
- 同 上 / 角形鋼管接合部の研究(その8, 補強板をつけた場合) /
日本建築学会近畿支部研究報告集 昭和43年5月